

**DESARROLLO DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL INGENIO
SAN CARLOS S.A. DEL MUNICIPIO DE TULÚA-VALLE DEL CAUCA**

JUAN DAVID ALZATE PINEDA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA RISARALDA
2020**

**DESARROLLO DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL INGENIO
SAN CARLOS S.A. DEL MUNICIPIO DE TULÚA-VALLE DEL CAUCA**

JUAN DAVID ALZATE PINEDA

**Práctica conducente a trabajo de grado
para aspirar al título de Ingeniero Mecánico**

Asesor

Yamid Alberto Carranza Sánchez - Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA RISARALDA
2020**

Nota de aceptación

Firma Del Jurado

Pereira junio de 2020

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1.PROCESOS DE PRODUCCIÓN INGENIO AZUCARERO SAN CARLOS.....	14
2.METODOLOGÍA DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	21
2.1.PREPARACIÓN Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA.....	23
2.2.PREPARACIÓN Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	30
2.3.GENERACION VAPOR A PARTIR DEL BALANCE DE ENERGIA	34
2.3 GENERACION ELECTRICA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	42
3.RESULTADOS.....	44
3.1.PREPARACION Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGIA.....	44
3.2.GENERACIÓN DE VAPOR A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGIA .	48
3.3.GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	49
4.ESCENARIOS DE CAMBIO.....	51
5.CONCLUSIONES	57
6.RECOMENDACIONES.....	58
7.BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.	22
TABLA 2 MEDICIONES INICIALES DE LA SECCIÓN DE MOLIENDA.	24
TABLA 3 ENTRADAS DE ENERGÍA MOLIENDA.	31
TABLA 4 MEDICIONES NECESARIAS MÉTODO DIRECTO DE EFICIENCIA DE CALDERA	35
TABLA 5 PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE LA CALDERA.	38
TABLA 6 VARIABLES DE EFICIENCIA DE CALDERA MÉTODO INDIRECTO	39
TABLA 7 MAGNITUDES DEL ÁREA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.	42
TABLA 8 ENTRADAS DE MASA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA.	44
TABLA 9 ENTRADAS DE ENERGÍA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA	45
TABLA 10 SALIDAS DE MASA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA	45
TABLA 11 SALIDA DE ENERGÍA DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA	46
TABLA 12 PÉRDIDAS DE PREPARACIÓN Y MOLIENDA	47
TABLA 13 ENTRADAS DE GENERACIÓN VAPOR.	48
TABLA 14 SALIDAS DE GENERACIÓN VAPOR	48
TABLA 15 PÉRDIDAS DE GENERACIÓN	49
TABLA 16 ENTRADA DE MASA Y ENERGÍA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.	49
TABLA 17 SALIDA DE ENERGÍA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	50
TABLA 18 GENERACIÓN ELÉCTRICA	50
TABLA 19 COSTOS DE MANTENIMIENTO TURBINA, VALORES EN PESOS CO	52
TABLA 20 COSTOS DE MANTENIMIENTO MOTOR ELÉCTRICO, VALORES EN PESOS CO	52
TABLA 21 PARÁMETROS PARA MOTOR MOL #5	53
TABLA 22 ESCENARIOS DE OPERACIÓN.	56

LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 1 DIAGRAMA DEL PROCESO. -----	15
FIGURA 2 PREPARACIÓN Y MOLIENDA.-----	17
FIGURA 3 GENERACIÓN VAPOR. -----	19
FIGURA 4 GENERACIÓN ELÉCTRICA. -----	20
FIGURA 5 DIAGRAMA DE SANKEY -----	37

GLOSARIO

AZÚCAR: Sustancia cristalina perteneciente al grupo químico de los hidratos de carbono, de color blanco en estado puro, sabor dulce y soluble en el agua. Se obtiene de la caña dulce, la remolacha y de otros vegetales.

BAGACILLO: Fracción fina del bagazo.

BAGAZO: Se denomina bagazo al residuo de materia después de extraído su jugo, en este caso, de la caña de azúcar.

BRIX: Medida de los sólidos disueltos en azúcar (jugo, licor o jarabe), utilizando un refractómetro. También conocidos como sólidos secos refracto-métricos. Para soluciones que contienen únicamente azúcar y agua $\text{Brix} = \% \text{ en masa de azúcar}$.

EXTRACCIÓN: Proporción de azúcar extraído de la caña en la planta de extracción; corresponde a la masa de azúcar en jugo diluido como porcentaje de la masa de azúcar en caña.

FIBRA: Estructura fibrosa, insoluble y seca de la caña. Generalmente se refiere a todo el material insoluble que llega con la caña a la fábrica, incluyendo, por lo tanto, el suelo u otra materia extraña insoluble en caña.

IMBIBICIÓN: Proceso de agua añadida a la caña en la planta de extracción para el aumento del agua. El agua añadida se denomina agua de imbibición.

JUGO DILUIDO: Jugo obtenido en el proceso de extracción. También se conoce como jugo mezclado (de molinos) o jugo preliminar (de difusores).

JUGO RESIDUAL: Jugo obtenido del último molino del proceso de extracción.

MATERIA EXTRAÑA: Incluye toda hoja y cogollo de caña, barro, tierra, raíces, piedras y metales entregados con la caña.

PUREZA: La pureza real representa el contenido de sacarosa expresado como porcentaje de la sustancia seca o el contenido de sólidos disueltos. Los sólidos comprenden el azúcar y no-sacarosas, así como invertidos. La pureza es obtenida a través de la relación: $\text{Pureza} = (\% \text{ Sacarosa} / ^\circ \text{ Brix}) * 100$.

SACAROSA: Es el compuesto químico puro $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ que es conocido como azúcar blanco.

SÓLIDOS DISUELTOS: Todo material soluto que está en solución, incluyendo sacarosa, monosacáridos, cenizas y otras impurezas orgánicas.

TÁNDEM: Unión de dos o más equipos que realizan una misma actividad en equipo o que combinan sus esfuerzos para hacer algo.

RESUMEN.

El presente informe ha sido realizado en el período de práctica universitaria del autor con el fin de dar cuenta del balance de masa y energía en tres departamentos de producción del Ingenio San Carlos, ubicado en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca, Colombia. Este tipo de análisis deben realizarse periódicamente, pues sirven como instrumento de control de los parámetros de verificación de pérdidas, otorgando al ingenio una herramienta útil para su buen funcionamiento; además, este proyecto es complementario a los procesos de autoevaluación del ingenio azucarero.

En este sentido, el documento ha sido construido a partir de los valores de operación promedio de los meses de octubre y noviembre del año 2019. Para llevar a cabo tal propósito, en primer lugar, se hace una contextualización de las áreas de producción internas del ingenio, tales como son: la preparación y molienda de caña, la generación vapor y la generación eléctrica; cada área es delimitada en sus condiciones de frontera en forma de caja negra, se señalan así sus entradas y salidas de materia y energía.

En segundo lugar, para el balance de materiales por área se requirió la construcción de una tabla de valores promedio de las medidas necesarias tanto de entrada y salida de materia y energía, aportados por la sección de instrumentación y laboratorio del ingenio San Carlos. Una vez delimitada la sección se da inicio al balance de materiales y energía, de acuerdo con procedimientos sugeridos por los autores citados en la sección trabajada. A partir de este ejercicio se presentan recomendaciones para la operación de la sección de preparación y molienda de caña donde se evidenció mayor gasto energético. Estas acciones permitirían ingresos económicos para el ingenio azucarero por la venta del nuevo bagazo disponible no requerido en la combustión y la energía eléctrica sobrante.

Palabras claves: caña de azúcar, balance de masa y energía, bagazo, extracción de sacarosa.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ingenio azucarero San Carlos tiene una jornada de producción de 24 horas por 7 días a la semana; este periodo conlleva a que la alteración de alguna de las variables de operación afecte en gran medida sus entradas económicas, sin embargo, estas variaciones pueden ser no tan visibles o fáciles de percibir, pero pueden generar pérdidas significativas y no ser detectadas en semanas.

Se hace necesario entonces una revisión constante de las variables de operación del ingenio azucarero además de construir un modelo para revisiones posteriores. Esta revisión es fundamental para la correcta operación del ingenio, la planificación y ejecución de los mantenimientos de las diferentes maquinarias, la asignación de recursos a cada una de las áreas de trabajo, así como la división mensual del presupuesto.

El estado de las variables es siempre el punto de partida en proyectos de expansión, actualización de maquinaria o proyectos de inversión puesto que se enfoca en la mejora o corrección de la magnitud de una variable.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el estado de las variables de operación de las áreas de preparación y molienda de caña, generación vapor y generación eléctrica del ingenio San Carlos, Tuluá-Valle del Cauca?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la magnitud de las variables de masa y energía en la entrada, salida y la pérdida en los procesos de las áreas de molienda, generación de vapor y generación eléctrica, a partir del balance de masa y energía, del ingenio azucarero San Carlos del municipio de Tuluá, Valle del Cauca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de molienda del ingenio San Carlos.
- Identificar las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de generación de vapor del ingenio San Carlos.
- Estimar las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de generación eléctrica del ingenio San Carlos.
- Estimar la ganancia de las modificaciones propuestas en las instalaciones del ingenio San Carlos en el área de molienda.

INTRODUCCIÓN.

El azúcar es uno de los productos con mayor demanda en los mercados, tanto nacionales como internacionales; en el año 2019 se logró un aproximado de 23 millones de toneladas de caña molida, de los cuales se alcanzó una exportación de azúcar de alrededor de 690000 toneladas (El País, 2019). Esta dinámica en la producción exige, por un lado, que los ingenios azucareros en Colombia tengan jornadas de producción de 24 horas por 7 días y se programen, a su vez, períodos de suspensión de las actividades para dar paso a las labores de mantenimiento requeridas por la maquinaria para su óptimo funcionamiento.

Estas condiciones exigen que el personal responsable, realice una constante revisión de las variables de operación y producción puesto que las alteraciones mínimas en cualquier factor del proceso pueden incurrir en elevadas pérdidas económicas para el ingenio o por el contrario, pueden conllevar a la toma de decisiones por parte de la empresa en materia de recursos humanos o en la intervención de los equipos, medidas que inciden favorablemente en las utilidades del ingenio.

De acuerdo con lo anterior, en el período de práctica del autor, se le presentó a la empresa la propuesta de establecer un balance alternativo de masa y energía en los departamentos de molienda, generación de vapor y generación eléctrica en el ingenio azucarero San Carlos, ubicado en el municipio de Tuluá (Valle del Cauca) durante los meses de octubre y noviembre de 2019. Este trabajo no tomará los resultados del balance tradicional que se realiza en el ingenio, de esta manera existe la posibilidad de abordar otros aspectos antes no considerados. El proyecto fue bien recibido por el ingenio San Carlos a través del ingeniero Cristian Lozano Sánchez, jefe de molienda y generación de vapor quien autorizó la toma de datos y mediciones; así mismo, se contó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Pereira, mediante la asesoría docente del ingeniero Yamid Alberto Carranza Sánchez.

Para abordar los conceptos iniciales de la industria azucarera se basa en los contenidos de los autores (Rein, 2012) y (Hugot, 1972), el balance de masa y energía se calculó en las secciones de preparación y molienda, generación vapor y generación eléctrica del ingenio. Cada división tiene diferentes condiciones de operación, lo que exigió que en la recolección de la información y en el análisis de los datos se utilizaran metodologías distintas en cada caso por lo que se presentara el balance por área del ingenio, Para abordar la sección de preparación y molienda de caña cuyo objetivo es la extracción de sacarosa se definió la condición de frontera en los equipos encargados de dicha extracción como son los molinos trapiche, para esto se requirió dividir el balance en masa y energía por separado para esto se siguieron los lineamientos propuestos por la autora (Plascencia, 2014) que presenta el balance de materiales y una estimación final de pérdida de sacarosa. En la sección de generación vapor encargada de la evaporización del

agua se centra en la menor pérdida de energía posible, dicha energía se ve reflejada en el cálculo de la eficiencia de la caldera, procedimiento que se realizó en base al autor (Castro, 2002). En el área de generación eléctrica se realizó con base en los principios (Yunus A & Michael A., 2009) y (Charles & Matthew , 2006) para finalmente presentar sus promedios de generación.

Una vez se analizaron los datos de balance de masa y energía en cada sección, el informe propone una modificación en la operación y se proyectan en condiciones normales, las ganancias económicas que se obtendrían en caso de implementarlas.

1 PROCESOS DE PRODUCCIÓN INGENIO AZUCARERO SAN CARLOS

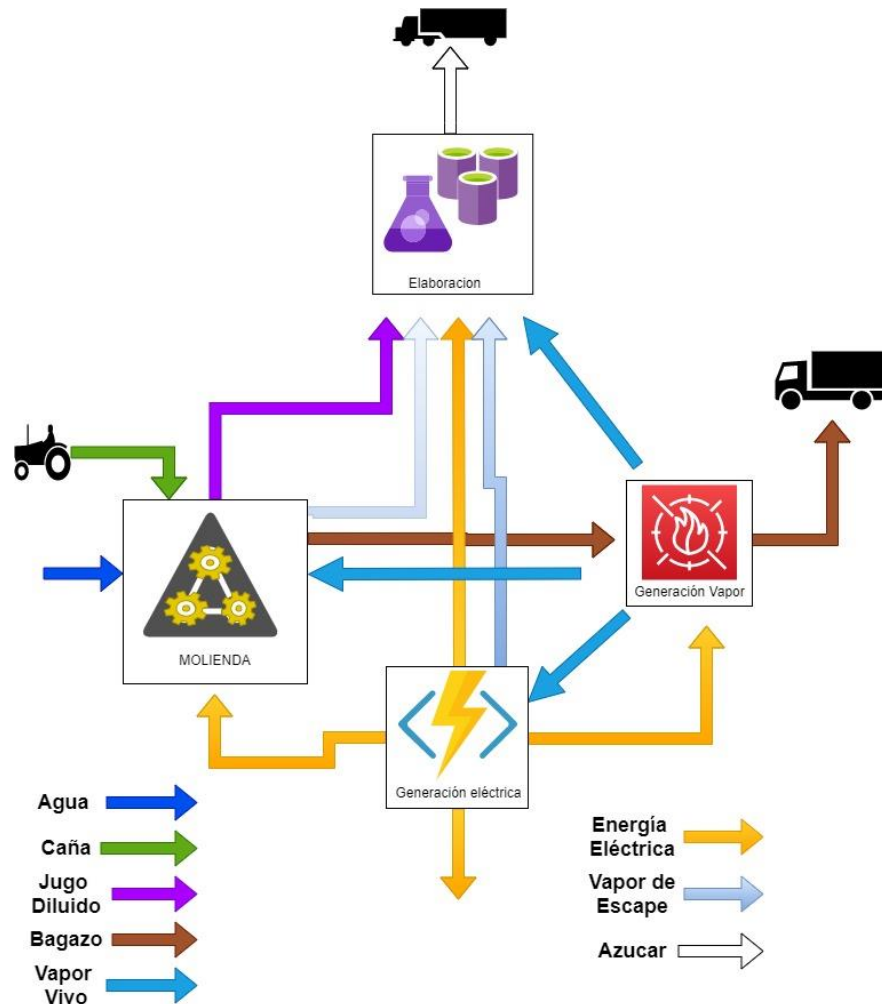
El ingenio San Carlos S.A se encuentra ubicado en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca, éste fue fundado en 1945 por Carlos Sarmiento Lora y María Cristina Palau, a partir de su fundación hasta el día de hoy, la compañía se ha posicionado como una de las empresas líderes de la región, siendo generadora de empleo y progreso en su zona de operación. Además, hace parte de diferentes proyectos para la comunidad, tales como la construcción de vías, la donación de terrenos, el patrocinio de eventos para la población, etc.

En el año 2014 el grupo Mayagüez se convirtió en el mayor accionista del ingenio San Carlos. Con un nuevo enfoque, la compañía centra sus esfuerzos de producción en azúcar por quintales de 25 kg y 50 kg, además de proyectos de expansión para la venta en presentación de 1 Tm y de miel de purga vendida para la industria ganadera.

Un ingenio azucarero es el nombre que recibe una compañía productora de azúcar a partir de la caña de azúcar, este comprende desde la preparación del terreno, siembra y cosecha de caña, su traslado a la fábrica donde inicia la extracción de sacarosa para su posterior tratamiento y finalmente empaque y distribución.

El presente trabajo se desarrolla en la sección de fábrica, sus procesos de elaboración de azúcar pueden ser representado de la siguiente manera:

Figura 1 Diagrama del proceso.



Fuente: Elaboración propia

Como lo indica el anterior diagrama, la producción de azúcar en el ingenio San Carlos se divide en 4 áreas principales:

- Preparación de Caña y Molienda: sección encargada de la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar en forma de jugo diluido.
- Generación Vapor: centrada en la caldera, esta genera el vapor de agua necesario para la producción.
- Generación Eléctrica: como su nombre lo indica, a través de un turbo generador se produce la energía eléctrica requerida para la diversidad de maquinaria y equipos involucrados en la producción.

- Elaboración: refinamiento del jugo diluido hasta obtener el azúcar en forma de cristal para la venta.

Existen otras divisiones que no se observan directamente en el diagrama como son los departamentos de Instrumentación y Metrología, Laboratorio, Inocuidad, Mantenimiento y Administración que hacen parte fundamental del ingenio.

El desarrollo del balance de masa y energía del presente informe está centrado en las áreas de preparación y molienda de caña, generación vapor y generación eléctrica. A continuación, se detallará el funcionamiento de cada una de estas:

PREPARACIÓN Y MOLIENDA DE CAÑA

El área de molienda es la división encargada de la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar; esta se desarrolla en dos etapas: la preparación y la molienda de la caña.

Preparación.

En la subdivisión de preparación de caña se modifican las condiciones en las que se encuentra la caña de azúcar traída de los campos de cosecha, esto es necesario debido a que la caña de azúcar tiene diferentes variedades, además de la edad de la planta y su modo de cosecha. Esta subdivisión permite una homogeneidad en la caña creando un colchón uniforme de material entregado a la molienda. La importancia de este proceso inicial es maximizar la extracción de sacarosa presente en la caña de acuerdo con lo planteado por los autores (Hugot, 1972) y (Rein, 2012).

Para lograr su objetivo esta subdivisión consta de dos equipos principales:

Picadora de caña: Una picadora de caña Fulton de 96 cuchillas que corta la caña sin extraer jugo para reducir el tamaño del material de entrada.

Desfibradora de caña: Una desfibradora SIMISA COP 5 de 66 Martillos que desgarrar la fibra de la caña sin extraer sacarosa, para la creación del colchón de material uniforme. Este equipo es impulsado por una turbina de vapor de capacidad 1200 Hp.

Molienda

Esta subdivisión realiza la extracción de la sacarosa para su posterior refinamiento. Para cumplir con este propósito cuenta con un tándem de 6 molinos trapiche que trabajan en serie recibiendo su primera entrada de masa que es el colchón de caña a moler, la caña contiene además de su fibra diferentes tipos de sólidos incluyendo la sacarosa. El primer molino recibe el colchón de caña preparada, extrae su sacarosa y le entrega la caña al molino posterior, al final del proceso, en el tándem, la caña es renombrada como bagazo ya que su contenido de sacarosa es reducido entre el 1.0% y el 2.0% siendo este bagazo su primera salida de masa.

Para ayudar al proceso de extracción de sacarosa de la fibra de caña se usa líquido en intervalos del tándem de molienda, esta es la segunda entrada de masa al área. Cuando este “remojo” se hace con agua es conocido como imbibición y cuando se realiza con jugo de extracción como maceración. El ingenio San Carlos realiza ambos tipos de remojo; en el último molino del tándem se le adiciona agua a la caña antes de la extracción; el jugo junto con el agua de imbibición es bombeada al molino anterior y así sucesivamente hasta el primer molino donde es bombeada al Trómel para su primera filtración, terminada esta filtración; el jugo es renombrado como jugo diluido y es enviado a la sección de elaboración siendo la segunda salida de masa del área.

De acuerdo con la descripción anterior, las condiciones de frontera de la sección de molienda son representadas en la caja negra de la siguiente manera:

Figura 2 Preparación y Molienda.



Fuente: Elaboración de propia

La sección de molienda cuenta con 5 motores eléctricos acoplados con su respectivo reductor de velocidad para el suministro de potencia de molinos, estos son alimentados por energía eléctrica generada por el ingenio, siendo esta la primera entrada de energía de la sección. Adicional se cuenta con una turbina alimentada por el vapor vivo procedente de la caldera que complementa la entrada de energía de la sección, desafortunadamente no se cuenta con medidor de flujo a la salida de dicha turbina ni del agua que se condensa en su interior estos molinos serán nuestras fronteras en el área de preparación y molienda de caña.

GENERACIÓN VAPOR

El área de generación vapor es la encargada, como su nombre lo indica, del calentamiento del agua para el suministro del vapor al ingenio azucarero. El vapor de agua es usado en diferentes procesos como calentamientos, limpieza, suministro de potencia y generación de energía eléctrica (Rein, 2012). Para la generación de vapor se cuenta con una caldera acuotubular marca Distral, que tiene una capacidad máxima de producción de 130 000 lb/día de vapor, esta caldera es alimentada únicamente con el bagazo como combustible que resulta del proceso de extracción y el bagazo sobrante es vendido a otras compañías generando así ingresos adicionales –factor autosuficiente del ingenio- este bagazo no contiene sensores de mediciones de masa en la entrada de la caldera, solo estimaciones por parte del operario de turno. Por otra parte, con el propósito de reducir emisiones a la atmósfera, la caldera cuenta con ciclones de ceniza que absorben los inquemados o ceniza, que posteriormente son dispuestos en un silo para su uso como abono en el proceso de siembra de la caña.

Los residuos de la combustión alojados en la parrilla viajera y transportados a las bandas de ceniza desafortunadamente no son caracterizados continuamente por lo que no es posible identificar el total de la masa resultante del proceso de generación, de acuerdo con esto el trabajo se centrará en la estimación del balance de energía.

Figura 3 Generación Vapor.

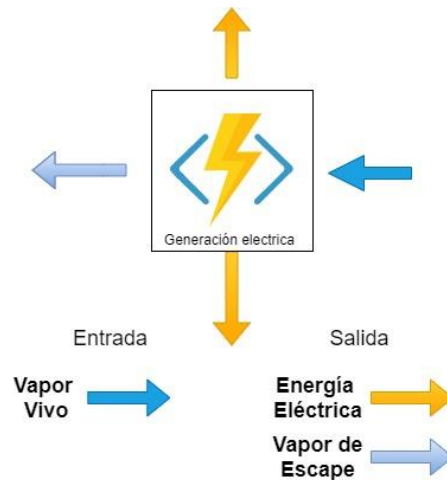


Fuente: Elaboración propia.

GENERACIÓN ELÉCTRICA

La división de generación eléctrica tiene como función la generación de energía eléctrica a partir del vapor de agua, de esta manera el ingenio azucarero San Carlos se convierte en una fábrica autosuficiente en materia de energía, además de obtener ingresos por la venta de energía eléctrica al municipio de Tuluá. El departamento cuenta con un turbo generador para cumplir con su objetivo, éste tiene una capacidad máxima de generación de 7 MW. En el año 2019 el ingenio azucarero rompió récord de exportación de energía eléctrica en el mes de septiembre con un total de 1192667 kWh.

Figura 4 Generación eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

El turbo generador consta de una turbina alimentada por el vapor vivo de la caldera siendo esta su entrada de masa, la energía eléctrica generada es distribuida en la fábrica y el sobrante es exportada al municipio de Tuluá, siendo esta energía eléctrica generada, su única salida de energía del área, por último el vapor que sale de la turbina es usado en procesos de calentamiento en el área de elaboración, sin embargo no cuenta con medición de flujo en el vapor de escape, ni en el agua condensada por lo que al igual que el área anterior se desarrollará un balance de energía de la sección de generación eléctrica.

2 METODOLOGÍA DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

Realizada la contextualización en el capítulo anterior de las áreas de operación del ingenio seleccionadas para el balance de masa y energía, se procede a cumplir con los objetivos planteados inicialmente. Se realiza entonces el estudio cuantitativo del balance de masa y energía, el cual permitirá medir las variables de entrada, salida y pérdidas. Este balance de masa y energía se realiza en concordancia con la primera ley de la termodinámica (Yunus A & Michael A., 2009).

A continuación, se presenta la operacionalización de variables consideradas para determinar la magnitud de entrada, salida y pérdida en los procesos de las áreas de molienda, generación de vapor y generación eléctrica, a partir del balance de masa y energía del ingenio azucarero San Carlos:

Tabla 1 Operacionalización de variables.

Áreas	Variables	Dimensiones	Indicador
MOLIENDA	Caña	Agua en caña	Entrada Tm
		Fibra	Entrada Tm
		Sólidos disueltos en caña	Entrada Tm
	Agua	Agua de inhibición	Entrada Tm
	Jugo	Agua de jugo diluido	Salida Tm
		Sólidos jugo diluido	Salida Tm
	Bagazo	Agua	Salida Tm
		Fibra	Salida Tm
	Electricidad	Energía eléctrica	Entrada kWh
	Vapor	Vapor vivo	Entrada lb
		Condensados	Salida lb
		Vapor de escape	Salida lb
	Energía vapor	Energía vapor vivo	Entrada kWh
		Energía vapor de escape	Salida kWh
	Energía mecánica	Energía aprovechada por molinos	Salida kWh
GENERACIÓN VAPOR	Bagazo	Agua	Entrada Tm
		Fibra	Entrada Tm
	Energía Bagazo	Energía entregada en combustion	Entrada MWh
	Electricidad	Energía eléctrica	Entrada kWh
	Agua	Agua de alimentación	Entrada lb
	Energía Agua	Energía en el agua de alimentación	Entrada MWh
	Residuos de combustión	Residuos	Entrada Tm
	Energía vapor	Energía vapor vivo	Salida MWh
	Vapor	Vapor vivo	Salida lb
	Vapor	Vapor vivo	Entrada lb
GENERACIÓN ELECTRICA	Energía vapor	Energía vapor vivo	Entrada MWh
		Energía vapor de escape	Salida kWh
	Electricidad	Electricidad generada	Salida kWh

Fuente: Elaboración propia.

Identificadas las variables del estudio se procede a resolver el primer objetivo específico “Calcular las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de molienda del Ingenio San Carlos.”

El desarrollo del balance de masa y energía de la sección de preparación y molienda del ingenio San Carlos parte de una recolección de mediciones del proceso de extracción recolectadas durante el segundo periodo del 2019, sus magnitudes fueron aportadas gracias a diferentes metodologías y procedimientos desarrollados en las secciones de laboratorio e instrumentación y metrología del ingenio San Carlos.

2.1 PREPARACIÓN Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA

El desarrollo del balance de masa de la sección de molienda se realiza a partir de la metodología desarrollada por Plascencia (2014) y la primera ley de la termodinámica (Yunus A & Michael A., 2009). Se describen las unidades de medida necesarias en la siguiente tabla:

Tabla 2 Mediciones iniciales de la sección de molienda.

Unidad de medida	Valor	Descripción.
%Sacarosa en bagazo	1,75	Sacarosa presente en el bagazo final que no fue extraído.
%Sacarosa en Caña	13,12	Sacarosa presente en la caña por moler.
Pza. de jugo residual.	79,43	Pureza del jugo obtenido del último molino.
%Humedad	48%	Porcentaje de agua presente en el bagazo que sale del último molino.
kg/día de caña molida	2242300	Cantidad de caña que entra a la sección de molienda en un día de operación.
%fibra en caña	13,27	Porcentaje de fibra de la caña entrante.
%Bagacillo en la caña	0,75	Porcentaje de bagacillo enviado a filtros de cachaza.
Pza. de jugo diluido	88,84	Pureza del jugo enviado al proceso de elaboración o jugo final.
Brix de jugo diluido	14,73	Porcentaje de sólidos solubles del jugo enviado a elaboración o jugo final.
kg / día de jugo mezclado	2246760	Cantidad total de jugo enviado a elaboración en un día de producción.
kg/h de agua de imbibición	5700	Cantidad de agua usada en el proceso de imbibición.

Fuente: Departamento de laboratorio e instrumentación y Metrología del Ingenio San Carlos (2019).

El procedimiento recomendado por (Plascencia, 2014) para obtener el balance de masa de la sección de preparación de molienda parte del siguiente listado de ecuaciones:

En primer lugar, determinar el % de sólidos disueltos en el bagazo (%Soli Bagazo), así:

$$\% \text{ Soli Bagazo} = \frac{\% \text{ Sacarosa en bagazo}}{\text{Pza de Jugo Residual}} * 100 \quad (1)$$

Seguidamente, determinar el % de fibra en el bagazo (%fibra Bagazo), así:

$$\% \text{ Fibra Bagazo} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ Solidos disueltos en bagazo}) \quad (2)$$

Con base a lo anterior, se estima la producción de bagazo por hora:

$$\frac{kg}{h} \text{ Bagazo producido} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ Caña molida} * \% \text{ Fibra caña}}{\text{Fibra}\% + \text{Bagazo}} \quad (3)$$

Usando el resultado de la ecuación 3, se encuentra, por lo tanto, el %bagazo en caña (%Bagazo Caña):

$$\% \text{ Bagazo Caña} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ Bagazo producido}}{\frac{kg}{h} \text{ Caña molida}} * 100 \quad (4)$$

A continuación, se estima en kg la cantidad de bagacillo (kg/h Bagacillo) enviado a elaboración para el proceso de filtrado de cachaza:

$$\frac{kg}{h} \text{ Bagacillo} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ Caña molida} * \% \text{ Bagacillo en la caña}}{100} \quad (5)$$

Por lo tanto, es posible estimar el bagazo enviado a calderas para combustión (kg/h Bagazo Caldera) a partir de las ecuaciones 5 y 3:

$$\frac{kg}{h} \text{ Bagazo Caldera} = \frac{kg}{h} \text{ Bagazo producido} - \frac{kg}{h} \text{ Bagacillo} \quad (6)$$

Por otra parte, se determina la cantidad de fibra en la caña (kg/h Fibra caña):

$$\frac{kg}{h} Fibra\ caña = \left(\frac{kg}{h} Caña\ molida * \% fibra\ en\ Caña \right) * 100 \quad (7)$$

Además, es necesario encontrar el porcentaje de agua de imbibición por fibra de caña (%Imbibición Fibra):

$$\% Imbibición\ Fibra = \frac{\frac{kg}{h} Agua\ de\ imbibición}{\frac{kg}{h} Fibra\ caña} * 100 \quad (8)$$

De la misma manera, se determina el porcentaje de agua de imbibición por caña molida (%Imbibición caña):

$$\% Imbibición\ Caña = \frac{\frac{kg}{h} Agua\ de\ imbibición}{\frac{kg}{h} Caña\ molida} \quad (9)$$

Por otro lado, se halla la cantidad de sacarosa en la caña a molida (kg/h sacarosa caña):

$$\frac{kg}{h} sacarosa\ caña = \frac{\frac{kg}{h} Caña\ molida * \% Sacarosa\ en\ Caña}{100} \quad (10)$$

De igual manera, se encuentra la cantidad de sacarosa en el bagazo producido (kg/h sacarosa bagazo):

$$\frac{kg}{h} sacarosa\ bagazo = \frac{\frac{kg}{h} Bagazo\ producido * \% Sacarosa\ en\ bagazo}{100} \quad (11)$$

Con base a las ecuaciones 10 y 11, se determina la sacarosa en el jugo diluido (kg/h sacarosa jugo diluido):

$$\frac{kg}{h} \text{ sacarosa jugo diluido} = \frac{kg}{h} \text{ sacarosa caña} - \frac{kg}{h} \text{ sacarosa bagazo} \quad (12)$$

Y partiendo del concepto de Pureza (Pza.):

$$Pza = \frac{\text{Sacarosa}}{\text{Brix}} \quad (13)$$

Se deduce:

$$\frac{kg}{h} \text{ Soli de Jugo diluido} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ sacarosa jugo diluido}}{Pza. de Jugo diluido} * 100 \quad (14)$$

Determinados los sólidos, estos se deben separar de los no azúcares (%Solid No Azúcar) para encontrar la cantidad disponible a procesar:

$$(\%Solid \text{ No Azúcar}) = \text{Brix de Jugo diluido} - \text{sacarosa de jugo diluido} \quad (15)$$

Con base a las ecuaciones 3 y 1 se determinan la cantidad total de sólidos disueltos en el bagazo (Kg/h soli bagazo):

$$\frac{kg}{h} \text{ soli bagazo} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ Bagazo producido} * \% \text{ Soli Bagazo}}{100} \quad (16)$$

Con base a las ecuaciones 14 y 16 se determina la cantidad de sólidos entrantes en la caña (Kg/h soli Caña):

$$\frac{kg}{h} \text{ soli Caña} = \frac{kg}{h} \text{ Soli de Jugo diluido} + \frac{kg}{h} \text{ soli bagazo} \quad (17)$$

Además, es posible estimar la cantidad máxima teórica de extracción de jugo, conocido como jugo absoluto:

$$\frac{kg}{h} \text{ Jugo Absoluto} = \frac{kg}{h} \text{ Caña molida} - \frac{kg}{h} \text{ Fibra caña} \quad (18)$$

Con las ecuaciones 17 y 18 se determina el brix del jugo absoluto (Brix absoluta):

$$\text{Brix Absoluta} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ soli Caña}}{\frac{kg}{h} \text{ Jugo Absoluto}} * 100 \quad (19)$$

Con las ecuaciones 10 y 17 se determina la pureza del jugo absoluto (Pza Absoluta):

$$\text{Pza Absoluta} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ sacarosa caña}}{\frac{kg}{h} \text{ soli Caña}} * 100 \quad (20)$$

Con las ecuaciones 19 y 20 se determina la sacarosa del jugo absoluto (Sacarosa Absoluta):

$$\text{Sacaroza Absoluta} = \text{Brix Absoluta} * \text{Pza Absoluta} \quad (21)$$

Con las ecuaciones 17 y 18 se determina la cantidad de agua en la caña a moler:

$$\frac{kg}{h} \text{ Agua Caña} = \frac{kg}{h} \text{ Jugo Absoluto} - \frac{kg}{h} \text{ soli Caña} \quad (22)$$

Con base a la ecuación 22 se determina el porcentaje de agua de la caña a moler (%Humedad Caña):

$$\%Humedad \text{ Caña} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ Agua Caña}}{\frac{kg}{h} \text{ Caña molida}} * 100 \quad (23)$$

A partir de la ecuación 14 se determina la cantidad de agua del jugo extraído, (Agua Jugo diluido):

$$\frac{kg}{h} \text{ Agua jugo diluido} = \frac{kg}{h} \text{ Jugo Diluido} - \frac{kg}{h} \text{ Soli de Jugo diluido} \quad (24)$$

Con la ecuación 22 y 24 se determina la cantidad de agua en el bagazo enviado a calderas (Agua Bagazo):

$$\frac{kg}{h} \text{ Agua Bagazo} = \frac{kg}{h} \text{ Agua Caña} + \frac{kg}{h} \text{ Agua Imbibicion} - \frac{kg}{h} \text{ Agua jugo diluido} \quad (25)$$

Finalmente se estima el porcentaje de pérdida por la sacarosa presente en el bagazo al total de la sacarosa entrante en la caña (%Pérdida Sacar Bagazo), de esta manera se obtiene la magnitud de la primera perdida que representa el porcentaje de sacarosa al total entrante que no fue aprovechada.

$$\%Pérdida \text{ Sacar Bagazo} = \frac{\frac{kg}{h} \text{ sacarosa bagazo}}{\frac{kg}{h} \text{ Caña molida}} * 100 \quad (26)$$

$$\%Pérdida \text{ Sacar Bagazo} = 0,5\%$$

2.2 PREPARACIÓN Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE ENERGÍA.

El balance de energía se realiza basado en la primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía, como describe (Yunus A & Michael A., 2009). “Esta expresa que, durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye”, en complemento con el anterior principio se detallarán conceptos necesarios para el desarrollo del balance de energía basados en (Charles & Matthew , 2006).

Energía.

La energía se define como la capacidad que tiene la materia o un objeto u equipo para producir trabajo, esta es expresa en la unidad de medida de Joule (J).

$$Energia = J$$

Potencia.

La potencia se define como la cantidad de energía consumida durante un tiempo determinado para cumplir con un trabajo, por lo que su unidad de medida es el Watt (W):

$$Potencia = \frac{J}{s} = W$$

Con base a los dos conceptos anteriores, se explica que en el común diario se exprese la energía en términos de Wh esto debido a que consideramos el consumo de potencia en un tiempo específico.

$$Energia = Potencia * Tiempo = \frac{J}{s} * s = J$$

Basados en estos conceptos se detalla a continuación las medidas necesarias para el cálculo de energía de entrada y salida al sistema, ver tabla 3.

Tabla 3 Entradas de energía Molienda.

Unidad de medida	Valor	Descripción.
Energía Eléctrica	26487 kWh/día	Consumo de energía eléctrica en un día de operación del área de preparación y molienda.
Energía Eléctrica de Molinos	15370 kWh/día	Consumo de energía eléctrica en un día de operación de los molinos 1,2,3,4,6
Flujo de vapor	7500 lb/hora	Cantidad de vapor por hora consumida por cada turbina.
Temperatura de entrada de vapor.	398 °C	Temperatura de entrada del vapor a las turbinas.
Presión de entrada de vapor	44,8 bar	Presión de entrada de vapor a la turbina.
Presión de salida de vapor.	1,37 bar	Presión de salida de vapor a la turbina.
Eficiencia Reductores	97%	Eficiencia promedio de los reductores acoplados a los molinos
Eficiencia motores eléctricos	97%	Eficiencia promedio de los motores eléctricos acoplados a los reductores

Fuente: Departamento de instrumentación y metrología del Ingenio San Carlos (2019).

En primera estancia se calculará la energía entregada a la turbina por parte del vapor procedente de la caldera de la siguiente manera:

$$Energía_{vapor} = \dot{m} * H_{entrada} * Tiempo \quad (27)$$

$$Energía_{vapor} = 0,945 \frac{kg}{s} * \left(3200 \frac{kJ}{kg} \right) * 24 h = 72576 kWh$$

El vapor que sale de la turbina a una menor presión y temperatura renombrado como vapor de escape no cuenta con medidor de flujo al igual que el agua en estado líquido condensada en su interior por lo que no es posible calcular la energía que

esta contiene, debido a esto se expresará en unidades de masa a través de la entalpía del vapor de escape.

$$Energía_{Vapor\ de\ escape} = H_{salida} \quad (28)$$

$$Energía_{Vapor\ de\ escape} = 2689 \frac{kJ}{kg}$$

Para la determinación de la energía mecánica suministrada por esta turbina es preciso determinar la potencia suministrada por la turbina de vapor para esto se tomarán las siguientes consideraciones:

- No se consideran pérdidas de presión en la línea de descarga de vapor de la turbina del molino #5.
- El vapor de salida de la turbina se considera como vapor saturado al no contarse con medición de flujo de condensados. De acuerdo con esto, la eficiencia de la turbina se asume en un 70%.

La potencia de la turbina es determinada de la siguiente manera:

$$W_{TURBINA} = \dot{m} * (H_{entrada} - H_{salida}) \quad (29)$$

$$W_{TURBINA} = 0,945 \frac{kg}{s} * \left(3200 \frac{kJ}{kg} - 2689 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$W_{TURBINA} = 483 \text{ kW}$$

Basados en los principios abordados inicialmente en este capítulo, se presenta la energía entregada por este equipo.

$$Energía_{TURBINA} = W_{TURBINA} * \text{Día de operacion} \quad (30)$$

$$Energía_{TURBINA} = 483 \text{ kW} * 24h$$

$$Energía_{TURBINA} = 11590 \text{ kWh}$$

Para la determinación de la energía mecánica de salida que es la ejercida por el molino #5 al colchón de caña para su extracción, se debe considerar la eficiencia del reductor acoplado a la turbina.

$$Energía\ mecánica_{Mol\ 5} = Energía_{TURBINA} * \eta_{reductor} \quad (31)$$

$$Energía\ mecánica_{Mol\ 5} = 11590\ kWh * 0,97 = 11242,3\ kWh$$

De igual manera se obtiene la energía eléctrica aprovechada por los molinos considerando las eficiencias tanto de los reductores como de los motores eléctricos acoplados.

$$Energía_{Mol\ 1,2,3,4\ y\ 6} = Energía_{eléctrica} * \eta_{motor} * \eta_{reductor} \quad (32)$$

$$Energía_{Mol\ 1,2,3,4\ y\ 6} = 15370\ kWh * 0,97 * 0,97 = 14461.6\ kWh$$

A continuación, se obtiene el consumo de todo el tándem de molinos sumando las energías mecánicas entregadas al colchón de caña por la red eléctrica y el flujo de vapor:

$$Energía\ mecánica = Energía_{Mol\ 5} + Energía_{Mol\ 1,2,3,4\ y\ 6} \quad (33)$$

$$Energía\ mecánica = 11242,3\ kWh + 14461,6\ kWh$$

$$Energía\ mecánica = 25704\ kWh.$$

Con la determinación de la energía mecánica entregada, es posible el cálculo de las pérdidas de energía considerando la energía térmica y energía eléctrica entregada al área.

$$Pérdida\ energía = Energía_{vapor} + Energía_{eléctrica} - Energía\ mecánica \quad (34)$$

$$Pérdida\ energía = 72576\ kWh + 15370\ kWh - 25704\ kWh = 62242\ kWh$$

Finalmente, se obtiene la relación de la cantidad de caña molida y la energía necesaria para dicho proceso, esta relación permite observar cómo afectan los cambios en los suministros de energía del área.

$$\frac{Caña}{Energía} = \frac{2242300 \frac{kg}{día}}{62242 \frac{kWh}{día}} \quad (35)$$

$$\frac{Caña}{Energía} = 25,5 \frac{kg}{kWh}$$

2.3 GENERACION VAPOR A PARTIR DEL BALANCE DE ENERGIA

En el primer capítulo se mencionó que no es posible realizar un balance de masa puesto que no se cuenta con mediciones continuas de residuos sólidos provenientes de la combustión y alojados en la parrilla viajera además de los emitidos por la chimenea de la caldera; es así como el trabajo se centra en el desarrollo del balance de energía de la sección de generación vapor para cumplir con el segundo objetivo específico, “Identificar las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de generación de vapor del ingenio San Carlos”.

EFICIENCIA DE LA CALDERA.

El cálculo de la eficiencia energética de la caldera es un proceso imprescindible para el control de pérdidas, con este es posible la identificación de problemas en la operación y estrategias de control, para dicho cálculo se detallarán dos modelos diferentes de determinación de eficiencia de calderas: 1) método directo del cálculo de la eficiencia de la caldera, 2) método indirecto del cálculo de la eficiencia de la caldera.

MÉTODO DIRECTO DEL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA

El método directo parte de la diferencia de la cantidad de calor con la que entra el agua y el calor con el que esta sale ya en estado de vapor, relacionado con la cantidad de calor disponible a entregar por la combustión de bagazo en la caldera (Yunus A & Michael A., 2009), descrito en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Calor\ de\ salida}{Calor\ de\ entrada} \quad (36)$$

Las mediciones necesarias para la determinación de la eficiencia de la caldera por el método indirecto son descritas en la siguiente tabla.

Tabla 4 Mediciones necesarias método directo de eficiencia de caldera

Unidad de medida	Valor	Descripción.
Bagazo (ṁc)	24 Tm/h	Bagazo para combustión enviado de molienda.
Poder Calorífico superior del Bagazo (HHV)	3429,3 BTU/lb	Poder calorífico superior del bagazo
Vapor Generado (ṁv)	113870 lb/h	Cantidad de vapor por hora generado.
Presión de Vapor generado.	650 PSI.	Presión del vapor de agua a la salida de la caldera.
Temperatura de vapor generado.	371 °C	Temperatura del vapor de agua a la salida de la caldera.
Entalpía de vapor de entrada. (h _v)	3133,5 kJ/kg	Entalpía del vapor de agua a la salida de la caldera.
Temperatura de agua de alimentación.	114 °C	Temperatura del agua a la entrada de la caldera.
Entalpía de agua de alimentación. (h _a)	478,3 kJ/kg	Entalpía del agua a la entrada de la caldera en liquido saturado.
Potencia de Energía Eléctrica (W).	573 kW	Potencia de suministro de la red eléctrica usada en los equipos de calderas.

Fuente: Departamento de instrumentación y metrología del Ingenio San Carlos (2019).

El calor que contiene tanto el agua de alimentación como el vapor de agua a su salida se calculan con base a la siguiente ecuación.

$$Calor(Q) = \text{flujo de masa} * \text{entalpía} * \text{tiempo de flujo} \quad (37)$$

$$Q = \dot{m} * h * t$$

Con base a esto se calcula la cantidad de calor entrante en el agua de alimentación.

$$Q_{\text{Agua}} = 14,34 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 478,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 24\text{h} = 164625 \text{ kWh} \quad (38)$$

De igual manera se calcula la cantidad de calor saliente en el vapor del agua:

$$Q_{vapor} = 14,34 \frac{kg}{s} * 3133,51 \frac{kJ}{kg} * 24h = 1078429 kWh \quad (39)$$

El calor aportado por el bagazo en su combustión se determina de la siguiente manera:

$$Calor(Q) = flujo\ de\ masa * poder\ calorifico * tiempo\ de\ flujo \quad (40)$$

$$Q = \dot{m} * HHV * t$$

La magnitud del calor entrante por el bagazo es entonces:

$$Q_{bagazo} = 6,67 \frac{kg}{s} * 7990,03 * 24h = 1278400 kWh \quad (41)$$

Finalmente, se determina el consumo de energía eléctrica del área:

$$Energía_{eléctrica} = Potencia * Tiempo \quad (42)$$

$$Energía_{eléctrica} = 573Kw * 24h = 13752kWh$$

Obtenidos los diferentes calores tanto de entrada como de salida, la eficiencia por el método directo es descrita de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\dot{m}v(hv - ha)}{\dot{m}c(HHV) + W} \quad (43)$$

Remplazando en la ecuación 31 se tiene: 38075,1378 53293 53866,3

$$\eta = \frac{14,34 \frac{kg}{s} (3133,51 \frac{kJ}{kg} - 478,34 \frac{kJ}{kg})}{6,67 \frac{kg}{s} * 7990,03 * \frac{kJ}{kg} + 573kW} * 100$$

$$\eta = 70\%$$

Por el método directo se determina una eficiencia del 70%, se revisan las condiciones de la sección y se encuentran las siguientes dificultades en el cálculo directo de la eficiencia de la caldera:

- No existe una medición directa de la cantidad de bagazo que entra a la caldera, sólo una estimación realizada por el operario de caldera de acuerdo con el flujo de bagazo por los conductores.

- El cálculo del poder calorífico realizado por el operario no considera el cambio del porcentaje de inquemados, se trabaja con un valor constante del 10% de inquemados o ceniza.

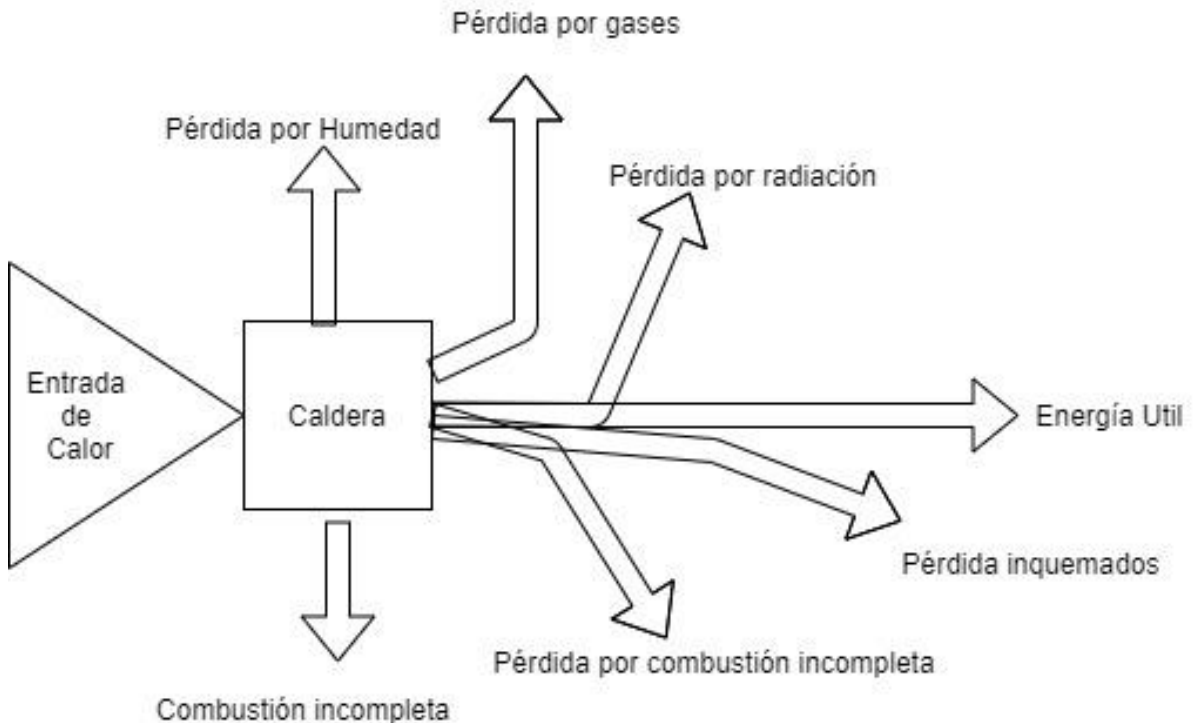
MÉTODO INDIRECTO DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.

Este método alternativo nace de la necesidad de obtener más información sobre los problemas que afectan a la caldera, si bien la eficiencia nos permite tener una idea del funcionamiento, ésta no es precisa en los problemas puntuales que afectan el rendimiento de la caldera (Rein, 2012). Este método inicia precisamente en todos los factores que disminuyen el rendimiento de la caldera y luego se le resta al total de eficiencia, de la siguiente manera:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \text{Pérdida de Energía}}{HHV}\right) * 100 \quad (44)$$

El autor (Castro, 2002) describe el procedimiento de cálculo del método indirecto a partir de los lineamientos de la norma (ASME PTC 4.1), en primer lugar, se definen las pérdidas de energía de la caldera.

Figura 5 Diagrama de Sankey



Fuente: Tomado de (Castro, 2002)

Las pérdidas necesarias para determinar la eficiencia de la caldera serán entonces:

Tabla 5 Pérdidas de energía de la caldera.

Sigla	Descripción de pérdida
Q_1	Pérdida por calor perdido en los gases expulsados en la combustión.
Q_2	Pérdida por la cantidad perdida de calor debido a la eliminación de humedad presente en el combustible de la combustión.
Q_3	Pérdida de calor por combustión de hidrógeno presente.
Q_4	Pérdida por la combustión incompleta.
Q_5	Calor no generado por la no combustión de los inquemados (Ceniza)
Q_6	Pérdida de calor por radiación de las paredes de la caldera.

Fuente: Tomado de (Castro, 2002)

Teniendo en cuenta la anterior tabla, la pérdida total queda descrita de la siguiente manera:

$$\sum \text{Pérdida de Energía} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (45)$$

Para la determinación de las pérdidas se presenta el procedimiento descrito por (Castro, 2002), con base en la siguiente tabla donde se describen las mediciones necesarias para dicho cálculo.

Tabla 6 Variables de eficiencia de caldera método indirecto

Unidad de medida	Valor	Descripción.
%O ₂	7	Porcentaje de oxígeno en los gases de salida.
%N ₂	81,67	Porcentaje de Nitrógeno en los gases de salida.
%CO	0,13	Porcentaje de monóxido de carbono en los gases de salida.
%CO ₂	11,2	Porcentaje de dióxido de carbono en los gases de salida.
T A	48,6 ° F	Temperatura del aire de entrada a la caldera.
T G	409,2 ° F	Temperatura de los gases de salida de la caldera
T F	59,4 ° F	Temperatura del bagazo de entrada a la caldera
%Hume Combust	48	Porcentaje de humedad del bagazo entrante a la caldera.
%Hidro Combust	3,21	Porcentaje de hidrógeno del bagazo entrante a la caldera.
% S	0,02	Porcentaje de azufre del bagazo entrante a la caldera.
CARBONO COMB.	21,66	Relación de carbono a bagazo.
%Ceniza	10%	Porcentaje de ceniza a bagazo entrante a la caldera
P.S. Ceniza	$2069 * \frac{Btu}{lb}$	Poder calorífico promedio de la ceniza.

Fuente: Departamento de laboratorio y departamento de instrumentación y metrología del Ingenio San Carlos (2019).

Se describirá entonces el procedimiento de cálculo de la eficiencia de la caldera.

En primer lugar, la ecuación de pérdida por calor cedido en los gases expulsados en la combustión:

$$Q_1 = PC * (0.24(TG - TA)) \quad (46)$$

En la que la sigla PC refiere a:

$$PC = (\text{LIBRA DE GAS SECO POR LIBRA DE COMBUSTIBLE}) \quad (47)$$

La cual está descrita de la siguiente manera:

$$PC = \frac{11CO_2 + 8O_2 + 7(CO + N_2)}{3(CO_2 + CO)} \quad (48)$$

De igual forma se presenta la ecuación para determinar las pérdidas por la cantidad pérdida de calor debido a la eliminación de humedad presente en el combustible de la combustión:

$$Q_2 = \%Hume\ Combust * (1,089 + 0,46\ TG - TF) \quad (49)$$

Seguidamente, se determina la pérdida de calor por combustión de hidrógeno presente:

$$Q_3 = 9 \frac{\%H}{100} * (1,89 + 0,46\ TG - TF) \quad (50)$$

A continuación, se presenta la ecuación de pérdida por la combustión incompleta:

$$Q_4 = \frac{CO}{CO_2 + CO} * 10,160 * \frac{CARBONO}{COMB.} \quad (51)$$

Por otro lado, se detalla la ecuación de calor no generado por la no combustión de los inquemados (Ceniza):

$$Q_5 = \%Ceniza * P.S. Ceniza \quad (52)$$

Finalmente, se presenta el valor asumido de pérdida de calor por radiación de las paredes de la caldera:

$$Q_6 = 8\% \quad (53)$$

Las pérdidas de radiación en la operación de la caldera son asumidas a valores promedio de operación de otras calderas, reemplazando en la ecuación 45 se obtiene:

$$\Sigma \text{Pérdida de Energía} = 412,81 + 584,55 + 339,77 + 2,422 + 206 + 275,84$$

$$\Sigma \text{Perdida de Energía} = 1752 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} * \text{combust}} \frac{\text{lb}}{\text{lb}}$$

Este valor es reemplazado en el concepto de eficiencia de la ecuación 44.

$$\eta = \left(1 - \frac{1752 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{3600 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}} \right) * 100$$

$$\eta = \left(1 - \frac{1752 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{3600 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}} \right) * 100$$

$$\eta = 51,33\%$$

Los problemas y/o dificultades encontrados en este método son:

- Como ya se describió en el método anterior, no existe una medición directa de la cantidad de bagazo que entra a la caldera, sólo una estimación realizada por el operario de caldera de acuerdo con el flujo de bagazo por los conductores.
- No existe medida de la cantidad de inquemados o ceniza a la salida de la caldera.
- Es necesaria la medida de radiación de las paredes de la caldera.

2.3 GENERACION ELECTRICA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

El área de generación eléctrica cuenta con medición de flujo, temperatura y presión a la entrada de su turbo generador, desafortunadamente no se cuenta con la medición de flujo en su salida, ni en sus condensados por lo que no es posible el cálculo de masa a su salida. A continuación, se detallan las magnitudes en la operación necesarias para el cálculo de las variables del área.

Tabla 7 Magnitudes del área de Generación Eléctrica.

Unidad de medida	Valor	Descripción.
Vapor de entrada.	1860000 $\frac{lb}{día}$	Cantidad de vapor suministrado al turbo generador.
Presión de entrada de vapor	44,8 bar	Presión del vapor de agua a la entrada del turbo generador.
Temperatura de entrada de vapor.	398 °C	Temperatura del vapor de agua a la entrada del turbo generador.
Energía eléctrica generada	108660 $\frac{kWh}{día}$	Cantidad de energía eléctrica generada por el turbo generador.

Fuente: Departamento de instrumentación y metrología del Ingenio San Carlos (2019).

La energía entrante al sistema entregada por el vapor de agua se calcula de igual manera que en la ecuación 27.

$$Energía_{Vapor} = \dot{m} * H_{entrada} * Tiempo \quad (54)$$

$$Energía_{Vapor} = 976 \frac{kg}{s} * \left(3200 \frac{kJ}{kg} \right) * 24 h = 750000 kWh$$

La energía térmica recibida por la turbina se calcula de la siguiente manera:

$$Energía_{TURBINA} = W_{TURBINA} * Día de operacion \quad (55)$$

$$Energía_{TURBINA} = 9,762 \frac{kg}{s} * \left(3200 \frac{kJ}{kg} - 2725 \frac{kJ}{kg} \right) * 24h = 111292 kWh$$

La pérdida en la generación de energía es calculada considerando la energía de entrada que fue determinada y la energía eléctrica generada que es medida por el ingenio azucarero:

$$Pérdida = Energía_{TURBINA} - Energía_{GENERADA} \quad (56)$$

$$Pérdida = 111292 \text{ kWh} - 108660 \text{ kWh}$$

$$Pérdida = 2632 \text{ kWh}$$

El ingenio determina una relación conocida como steam consumption esta relaciona la cantidad de vapor suministrado con la energía eléctrica generada. Este dato permite estimar la energía a ganar en diferentes escenarios de flujo de vapor, se determina de la siguiente forma:

$$steam\ consumption = \frac{lb\ Vapor\ de\ agua\ suministrada}{kW\ Energia\ electrica\ generada} \quad (57)$$

Remplazando en la ecuación se tiene que:

$$steam\ consumption = \frac{1860000 \frac{lb}{día}}{108660 \frac{kW}{día}}$$

$$steam\ consumption = 17,14 \frac{lb}{kW}$$

3 RESULTADOS

En cumplimiento a los objetivos específicos, se presentan a continuación los resultados de los cálculos de las magnitudes en las áreas seleccionadas del ingenio San Carlos.

3.1 PREPARACION Y MOLIENDA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGIA

ENTRADAS DE MASA.

Con base a la metodología desarrollada en el capítulo anterior y en concordancia con la Tabla 1 “Operacionalización de variables” se presenta en la tabla siguiente las variables de masa que entran en el área.

Tabla 8 Entradas de masa de preparación y molienda.

Entradas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Caña	Agua en Caña	1899,19	Tm	Determinada
	Fibra	297,5	Tm	Determinada
	Sólidos disueltos en caña	45,64	Tm	Determinada
Agua	Agua de imbibición	649,36	Tm	Medida
Total		2891,66	Tm	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

ENTRADAS DE ENERGIA

Las diferentes energías de entrada del área son descritas en la siguiente tabla:

Tabla 9 Entradas de energía de preparación y molienda

Entradas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Energía del vapor	Energía térmica	72576	kWh	Determinada
Energía eléctrica	Electricidad	15370	kWh	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

SALIDAS DE MASA

En la Tabla 10 son presentadas las salidas de masa del área de preparación y molienda.

Tabla 10 Salidas de masa de preparación y molienda

Salidas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Jugo	Agua de jugo Diluido	2214,3	Tm	Determinada
	Sólidos de Jugo Diluido	32,45	Tm	Determinada
	Agua en Bagazo	301,8	Tm	Determinada
Bagazo	Fibra	297,8	Tm	Determinada
Total		2846,35	Tm	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

SALIDAS DE ENERGÍA

A continuación, serán presentadas las salidas de energía del área de preparación y molienda.

Tabla 11 Salida de energía de preparación y molienda

Salidas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Energía del vapor	Energía vapor de escape	2689	kJ/kg	Determinada
Energía mecánica	Energía suministrada por motores y turbina	11242,3	kWh	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

PÉRDIDAS Y RELACIONES

Por último, en la sección de molienda se presentan las perdidas encontradas, dando cumplimiento al primer objetivo específico.

La primera pérdida es el %de sacarosa al total de caña, por la sacarosa presente en el bagazo, valor obtenido en la ecuación: 26

$$\%Pérdida\ Sacar\ Bagazo = 0,5\%$$

En segundo lugar, se expone la perdida de material en la sección:

$$Pérdida\ de\ material\ (Diferencia) = Entradas - Salidas = 45,31 \frac{Tm}{día} \quad (58)$$

La ecuación anterior representa la cantidad de perdida de material en un día de operación, seguidamente se presenta el porcentaje de error que representa.

$$\%Error = \left| \frac{V_{real} - V_{aprox}}{V_{real}} \right| * 100 = \left| \frac{2891,66 - 2846,35}{2891,66} \right| * 100 \quad (59)$$

$$\% Error = 1,57$$

Aunque la diferencia de entrada y salida son 45 Tm/día, el error porcentual oscila entre el 1,4% y 1,7 %, con este resultado se inicia una revisión del área donde se encuentran los siguientes factores que podrían ocasionar dicho error:

- Se usan valores promedio de medidas proporcionadas por laboratorio, esto genera un error porcentual cerca del 1 %.
- En el peso de la caña no se considera la materia extraña que se retira en el proceso de extracción.

- Existe pérdida por evaporación de agua.
- Aunque existen filtraciones en las bandejas de jugo, este es re bombeado a los tanques donde no se recupera en su totalidad.
- Existen filtraciones de bagazo que aunque son recuperadas y dispuestas de nuevo en la sección de preparación no se restablecen en su totalidad.

Con base en lo anterior se presenta la tabla final de pérdidas de la sección de preparación y molienda de caña.

Tabla 12 Pérdidas de preparación y molienda

Preparación y molienda			
Pérdida	Descripción	Magnitud	Indicador
%Pérdida de sacarosa en bagazo	% de la sacarosa de la caña no extraído	0,5	%
Pérdida de material	Diferencia de materia entre entrada y salida	45	Tm
Pérdida de energía	Diferencia de energía entregada y energía aprovechada	62242	kWh
$\frac{\text{Caña}}{\text{Energía}}$	Relación de caña a moler y energía suministrada	25,5	$\frac{kg}{kWh}$

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

De esta manera concluye el desarrollo del primer objetivo específico planteado inicialmente.

3.2 GENERACIÓN DE VAPOR A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGIA

En cumplimiento del segundo objetivo específico se presentarán los resultados obtenidos para el área de generación vapor.

ENTRADAS DE MASA Y ENERGIA

El área de generación vapor presenta las siguientes variables de entrada tanto de masa como de energía descritas en la siguiente tabla:

Tabla 13 Entradas de generación vapor.

Entradas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Energía del agua	Energía presente en el agua de alimentación.	164625	kWh	Determinada
Energía del bagazo	Energía aportada por la combustión del bagazo	1278400	kWh	Determinada
Energía eléctrica	Consumo de energía eléctrica	13752	kWh	Medida
Bagazo	Combustible de entrada a caldera	576	Tm	Estimada
Agua	Agua de alimentación	2732880	lb	Medida

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

SALIDAS DE MASA Y ENERGÍA

De igual manera se presenta la magnitud de las variables de masa y energía a la salida del área de generación vapor.

Tabla 14 Salidas de generación vapor

Salidas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Residuos solidos	Inquemados	N/A	N/A	No medida
Vapor de agua	Vapor vivo	2732880	lb	Medida
Energía en vapor	Energía en vapor	1078429	kWh	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

PÉRDIDAS

Las pérdidas del área de generación vapor son representadas en pérdidas de energía ya que al no medirse los inquemados, no es posible determinar la cantidad de pérdidas de masa.

Tabla 15 Pérdidas de generación

Generación vapor			
Pérdida	Descripción	Magnitud	Indicador
Pérdida de energía	Energía de la combustión del bagazo no entregada al agua	1752	Btu/lb

Fuente: Elaboración propia.

3.3 GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

ENTRADAS DE MASA Y ENERGIA

Para cumplir con el último objetivo “Estimar las magnitudes de entrada, salida y pérdida tanto de materia como de energía, en el área de generación eléctrica del ingenio San Carlos”. se presentan las entradas de masa y energía de la sección de generación eléctrica

Tabla 16 Entrada de masa y energía de generación eléctrica.

Entradas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Vapor de agua	Vapor vivo	1860000	lb	Medida
Energía Térmica	Energía en vapor	750000	kWh	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

SALIDAS DE MASA Y ENERGÍA

Seguidamente se presentan las salidas tanto de masa como de energía de generación eléctrica.

Tabla 17 Salida de energía de generación eléctrica

Salidas				
Variable	Dimensiones	Magnitud	Indicador	Procedencia
Energía eléctrica	Energía generada	108660	kWh	Determinada

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

PÉRDIDAS.

Tabla 18 Generación eléctrica

Generación vapor			
Pérdida	Descripción	Magnitud	Indicador
Pérdida de energía	Energía no transformada	2632	kWh

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

Con este último segmento se responde al objetivo general sobre la obtención de la magnitud de las variables de entradas y salidas tanto de masa como de energía en las áreas de preparación y molienda de caña, generación vapor y generación eléctrica seleccionadas para el balance de masa y energía del ingenio San Carlos.

4 ESCENARIOS DE CAMBIO

Con la determinación de las magnitudes de las variables de operación de las secciones de preparación y molienda de caña, generación vapor y generación eléctrica del ingenio San Carlos, se retoma el proyecto de inversión de electrificación en el área de molienda que consiste en la instalación de un motor eléctrico para el suministro de potencia para el molino # 5 del tándem de molienda.

Este proyecto nace de las siguientes problemáticas con la operación de la turbina de vapor:

- La dificultad de tener equipos no homogéneos en el tándem puesto que esto demanda mayores recursos y tiempo en los procesos tanto de planeación como de ejecución del mantenimiento.
- La antigüedad del equipo dificulta y/o encarece sus repuestos.
- Reducir la pérdida de energía en el suministro de potencia al tándem.

En primera medida se realiza un reconocimiento del equipo y se identifican ventajas y desventajas de su uso:

Ventajas del uso de turbinas de vapor:

- La turbina de vapor es un equipo confiable en operación.
- Es abastecido únicamente con el vapor generado por el ingenio.
- Tiene un máximo de suministro de potencia de 1200 Hp.

Desventajas del uso de turbinas de vapor:

- Por la antigüedad de los equipos no se cuenta con un buen nivel de instrumentación y metrología como lo son: medición de presiones a la salida de las turbinas, medición de temperatura a la salida de las turbinas y medición de condensados de las turbinas; lo que impide que se realice un preciso control de estos equipos.
- Las turbinas de vapor no son equipos eficientes en la relación de vapor de entrada a potencia de salida.
- Los costos de mantenimiento de las turbinas son elevados debido a la escasez de los repuestos en el mercado nacional.
- Las turbinas de vapor son equipos altamente ruidosos, lo que ocasiona un difícil ambiente de trabajo para el personal del área.

Complementando los anteriores incisos, se presenta en las siguientes tablas los costos proyectados de mantenimiento de los equipos en un año de operación.

Tabla 19 Costos de Mantenimiento Turbina, valores en pesos CO

Costos de mantenimiento de la turbina		
Mtto preventivo sistema eléctrico	\$	1'292308
Mtto preventivo sistema control	\$	1'292308
Mtto predictivo sistema eléctrico	\$	861.538
Mtto predictivo sistema control	\$	2'076923
Costo Repuestos Eléctricos	\$	923.077
Costo Repuestos Control	\$	1'153846
Mtto reductor Philadelphia	\$	25'000000
Mtto turbina	\$	54'000000
Mtto transmisión intermedia y baja	\$	25'000000
Mtto preventivo componente mecánico	\$	1'890000
Mtto predictivo componente mecánico	\$	1'389000
Costos de repuestos sistema de lubricación	\$	2'500000
Total	\$	117'379000

Fuente: departamento de Preparación y Molienda de caña ingenio San Carlos (2019).

Tabla 20 Costos de mantenimiento motor eléctrico, valores en pesos CO

Costos de mantenimiento motor eléctrico		
Mtto preventivo sistema eléctrico	\$	1'680000
Mtto preventivo sistema control	\$	1'680000
Mtto predictivo sistema eléctrico	\$	1'680000
Mtto predictivo sistema control	\$	1'680000
Costo Repuestos Eléctricos	\$	12'560000
Costo Repuestos Control	\$	6'790000
Mtto preventivo aire acondicionado	\$	1'200000
Mtto preventivo componente mecánico	\$	3'456000
Mtto predictivo componente mecánico	\$	2'345000
Costo Repuestos mecánico	\$	15'670000
Total	\$	48'741000

Fuente: departamento de Preparación y Molienda de caña ingenio San Carlos (2019).

$$\text{Ganancia en costos de mantenimiento} = 117'379000 - 48'741000 \quad (60)$$

$$\text{Ganancia en costos de mantenimiento} = 68'638000$$

Con base en la anterior ganancia, se presentarán a continuación los ingresos extra con las nuevas condiciones de operación con el remplazo de la turbina del molino # 5 del tándem de molienda.

ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE INGRESOS EXTRA POR MOTOR ELÉCTRICO EN EL MOLINO #5

Para la determinación de las nuevas condiciones de operación se requiere de las siguientes magnitudes actuales.

Tabla 21 Parámetros para motor Mol #5

Unidad de medida y/o Variable	Valor	Descripción.
Energía Mol #4	2225 $\frac{\text{kWh}}{\text{día}}$	Consumo de energía eléctrica del molino #4, se usa este valor debido a que son el mismo tipo de molino.
$\frac{\text{Bagazo}}{\text{Vapor}}$	$\frac{1}{2,1}$	Relación de bagazo - vapor de agua dado a partir de la eficiencia de la caldera por método directo.
Vapor	7000 $\frac{\text{lb}}{\text{hora}}$	Promedio de consumo de vapor de la turbina del Mol #5
\$ Tm Bagazo	40 000 pesos CO	Precio aproximado de tonelada de bagazo.
\$ kWh	192 pesos CO	Precio aproximado de venta de kilowatt

Fuente: Elaboración propia, departamentos de laboratorio, instrumentación y metrología del ingenio San Carlos (2019).

Consideraciones previas:

- La eficiencia de la caldera se mantendrá constante en la variación de la carga de combustible.
- El steam consumption del turbo generador se mantendrá constante en la variación de carga de vapor.
- El precio del bagazo y kWh se mantiene constante en el año de operación.

ENTRADA ECONÓMICA EN VENTA DE BAGAZO

Retomando el Steam consumption dado por la ecuación 40 y reemplazando la energía necesaria a partir del consumo de energía del molino #4 se tiene que:

$$17,14 \frac{lb (Vapor)}{kWh} * 2225 \frac{kWh}{día} = 38136,5 \frac{lb (Vapor)}{día} \quad (61)$$

Esta sería la cantidad necesaria de vapor a suministrar al turbo generador de la planta eléctrica, por lo que tendríamos un ahorro en vapor de:

$$7000 \frac{lb}{hora} * \frac{24 hora}{1 día} = 168000 \frac{lb}{día} \quad (62)$$

$$168000 \frac{lb}{día} - 38136,5 \frac{lb}{día} = 129863,5 \frac{lb (Vapor)}{día} \quad (63)$$

Llevando al sistema internacional:

$$129863,5 \frac{lb (Vapor)}{día} * \frac{1 Tm (Vapor)}{2205 lb} = 58,97 \frac{Tm (Vapor)}{día} \quad (64)$$

Considerando la relación de bagazo-vapor:

$$58,97 \frac{Tm (Vapor)}{día} * \frac{1}{2,1} \frac{Bagazo}{Vapor} = 28 \frac{Tm (Bagazo)}{día} \quad (65)$$

Se tendría un nuevo ingreso por venta de bagazo al día de:

$$Ingreso Extra = 28 \frac{Tm (Bagazo)}{día} * \frac{\$40 000 Co}{Tm (Bagazo)} \quad (66)$$

$$Ingreso Extra = 1120000 \frac{\$Co}{día}$$

ENTRADA ECONÓMICA POR VENTA DE ENERGIA

Se parte del steam consumption dado por la ecuación 17, se remplace el vapor requerido de la turbina de vapor del molino #5 determinando de esta manera la energía generada por dicho vapor:

$$\frac{7500 \frac{lb(Vapor)}{hora}}{17,14 \frac{lb(Vapor)}{kWh}} * \frac{24 horas}{día} = 10502 \frac{kWh}{día} \quad (67)$$

Al valor anterior se le debe restar la cantidad de energía necesaria para impulsar el molino #5, por lo tanto:

$$10502 \frac{kWh}{día} - 2225 \frac{kWh}{día} = 8277 \frac{kWh}{día} \quad (68)$$

La ecuación anterior muestra la cantidad de energía que se encontraría disponible para la venta, obteniendo unos ingresos aproximados de:

$$Ingreso Extra = 8277 \frac{kWh}{día} * 192 \frac{\$ Co}{kWh} \quad (69)$$

$$Ingreso Extra = 1589184 \frac{\$Co}{día}$$

En los dos escenarios anteriores cambia la magnitud $Energía_{TOTAL MOLINOS}$ por lo que su nuevo valor corresponde a:

$$Energía_{TOTAL MOLINOS} = W_{MOLINOS 1,2,3,4,6} + W_{MOLINOS 5}$$

$$Energía_{TOTAL MOLINOS} = 14461,6 \frac{kWh}{día} + 2225 \frac{kWh}{día}$$

$$Energía_{TOTAL MOLINOS} = 16687 \frac{kWh}{día}$$

De igual manera el indicador $\frac{Caña}{Energía}$ también cambia su magnitud como se ve en la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{Caña}}{\text{Energía}} = \frac{2242300 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{16687 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}}$$

$$\frac{\text{Caña}}{\text{Energía}} = 134,4 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

COMPARACION DE ESCENARIOS DE OPERACIÓN

Con base a las propuestas desarrolladas en este capítulo se expondrán finalmente los escenarios de operación en la siguiente tabla.

Tabla 22 Escenarios de operación.

Indicador o variable	Escenario Actual	Venta de bagazo	Venta de energía
%Pérdida Sacarosa Bagazo	0,50%	0,50%	0,50%
Pérdida de material	$45,64 \frac{\text{Tm}}{\text{día}}$	$45,64 \frac{\text{Tm}}{\text{día}}$	$45,64 \frac{\text{Tm}}{\text{día}}$
$\frac{\text{Caña}}{\text{Energía}}$	$86,1 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$	$134,4 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$	$134,4 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Ingreso extra	0	$1\,120\,000 \frac{\$Co}{\text{día}}$	$1'402\,184 \frac{\$Co}{\text{día}}$
Costos aproximados de mantenimiento de suministro de potencia Molino #5	$117'379\,000 \frac{\$Co}{\text{día}}$	$48'741\,000 \frac{\$Co}{\text{día}}$	$48'741\,000 \frac{\$Co}{\text{día}}$

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se observan las proyecciones de ingresos extra en los nuevos escenarios de operación y los costos aproximados de mantenimiento de los equipos que suministran o proporcionarían potencia al tándem.

5 CONCLUSIONES

El cálculo de las magnitudes de las variables en los procesos de preparación y molienda presentaron respecto a las entradas de masa un valor total de 2891 Tm, las entradas de energía se calcularon en 15370 kWh, salidas de masa en 2846,35 Tm, las pérdidas de masa ascendieron a 45 Tm y de energía en 62242 kWh. De acuerdo con esto, considerando el peor escenario en donde las 45 Tm de pérdida son bagazo disponible para combustión, se tendrían alrededor de 15300 Tm de pérdidas de bagazo al año, lo que representa 6 días de producción en condiciones normales.

El cálculo de las magnitudes de las variables en el área de generación vapor arrojaron a las entradas de masa un valor total de 1816 Tm, las entradas de energía se calcularon en 1456777 kWh, las salidas de masa no se pudieron ser calculadas en su totalidad, las de energía en 62242 kWh y unas pérdidas de energía de 1752 Btu/lb.

Finalmente las magnitudes del área de generación eléctrica en sus entradas presentaron un valor en masa de 1860000 lb, y una energía térmica de 750000 kWh, en su salida de energía una magnitud de 108660 kWh y un valor de 2632 kWh en las pérdidas de energía.

6 RECOMENDACIONES

Una vez finalizado el desarrollo del balance de masa y energía en el ingenio San Carlos del municipio de Tuluá valle del Cauca, el autor propone las siguientes recomendaciones.

En caso de seguir operando con las turbinas de vapor en la sección de preparación y molienda de caña, es necesario aumentar los instrumentos de metrología para un mayor seguimiento del funcionamiento de estos equipos, específicamente en las salidas de vapor de la turbina.

Es necesario reducir el número de filtraciones de agua, caña y bagazo en la sección de preparación y molienda de caña para reducir el índice de pérdida de maza.

Instalar un medidor de flujo de bagazo a la entrada de la caldera y en el sobrante de bagazo enviado a la bagacera, este valor es necesario para un correcto cálculo de la eficiencia de la caldera por cualquiera de los métodos.

Realizar el análisis elemental del material sobrante de la caldera más continuamente para reducir la incertidumbre del cálculo de la eficiencia de la caldera.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ASME PTC 4.1. (s.f.). *Performance Test Codes*, . The American Society of Mechanical Engineers.
- BEER , F., JOHNSTON, , E. J., MAZUREK, D., & EISENBERG, E. (2010). *MECÁNICA VECTORIAL*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Castro, J. (2002). *Operacion y Mantenimiento de Calderas*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Charles, A., & Matthew , S. (2006). *Fundamentos de circuitos electricos*. The McGraw-Hill.
- El País, R. (19 de Diciembre de 2019). Los retos que enfrenta el sector azucarero en el país de cara al 2020. <https://www.elpais.com.co/>.
- Escamilla Cobar, M. A. (2007). *ANÁLISIS ENERGÉTICO INTEGRAL DE INGENIO SANTA TERESA S.A*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hugot, É. (1972). *Handbook of cane sugar engineering*. Michigan: Universidad de Michigan.
- Plascencia, A. (2014). *MEMORIA DE EXPERENCIA PROFESIONAL*. Villa de Alvarez: Instituto Tecnológico de Colima.
- Rein, P. (2012). *INGENIERIA DE LA CAÑA DE AZUCAR*. BERLIN: Dr. Albert Bartens.
- Yunus A, C., & Michael A., B. (2009). *TERMODINÁMICA*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.